

УДК 681.5.01.23

Б.І. Кузнецов, Т.Ю. Василець, О.О. Варфоломійєв

Українська інженерно – педагогічна академія, Харків

## СИСТЕМА НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН З НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Виконано синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкобронированих машин. Розроблена структурна схема системи, компонентами якої є: пропорційно - диференціальний регулятор положення і нейромережевий регулятор швидкості. Виконано синтез нейрорегулятора з прогнозом. Проведено моделювання системи. Встановлено, що розроблена нейромережева система має високі динамічні характеристики.

**Ключові слова:** нейроконтролер з передбаченням, нейромережева система, система наведення та стабілізації озброєння легкоброньованої машини з нейроконтролером.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В даний час проводиться повсюдна модернізація бойової техніки, зокрема бойових машин піхоти і бойових колісних машин. Ці машини вітчизняного виробництва мають високі тактико-технічні характеристики і можуть успішно конкурувати із зарубіжною військовою технікою. При цьому вартість модернізації існуючих машин значно нижча за вартість нових. При модернізації бойових машин піхоти і бойових колісних машин в цілях підвищення ефективності ведення вогню основна увага приділяється системі управління вогнем. Найбільш ефективним напрямом при модернізації систем управління вогнем є впровадження системи наведення і стабілізації основного і допоміжного озброєння. Вимоги, що підвищуються, до тактико-технічних характеристик і якості систем управління примушують шукати нові шляхи вдосконалення автоматичних систем. Тому тема статті, присвячена розробці ефективної системи наведення і стабілізації озброєння легкобронированих машин, є актуальною.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** В даний час широко використовуються двохканальні системи стабілізації озброєння. Бойовий модуль таких систем встановлюється на корпусі машин за допомогою погонної шестерні, щодо осі, якою він повертається в горизонтальній площині, а блок озброєння кріпиться на бойовому модулі за допомогою цапф, щодо осі, яких він повертається у вертикальній площині.

Така побудова забезпечує стабілізацію і стабілізоване наведення засобів ведення вогню в горизонтальній і вертикальній площині, створюючи умови для ведення бойових дій з місця і з ходу по наземних і повітряних цілях. Використовувані системи стабілізації озброєння не можуть забезпечувати потрібних для ефективного ведення вогню значень помилки стабілізації, діапазону регулювання швидкості, не плавності наведення.

Розвиток мікропроцесорної техніки і теорії цифрових систем управління створив необхідні умови

для успішного вирішення поставлених завдань, шляхом заміни аналогових обчислювальних засобів цифровими [1, 2]. Використання цифрових методів обчислення дозволяє застосувати сучасні алгоритми управління, здійснювати зміну структури і параметрів алгоритмів управління. Найбільш ефективним напрямком є розробка систем управління на основі адаптивного підходу у поєднанні з методами теорії штучних нейронних мереж [3 – 6].

**Мета статті.** Метою роботи є розробка нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин, що відповідає заданим технічним характеристикам.

### 1. Математична модель виконавчого пристрою стабілізатора озброєння

Виконавчий пристрій стабілізатора озброєння (СО) складається з підсилювача (перетворювача) потужності, приводного двигуна (ПД) і кінематичного пристрою сполучення (КПС). Реальна кінематична схема системи наведення і стабілізації містить пружні елементи (елементи кінцевої жорсткості). Наявність пружних елементів ускладнює розрахункову схему механічної частини системи, перетворюючи її на багатомасову. Дослідження показали, що з достатньою для практичних розрахунків точністю механічна частина системи може бути представлена у вигляді двохмасової системи. Тоді процеси у виконавчому пристрої описуються такою системою рівнянь:

$$U_d = k_{ум} \cdot S_{упр};$$

$$I_{я} = \frac{1}{R_{я}} (U_d - L_{я} p I_{я} - c_{\phi} \omega_d);$$

$$M_d = I_{я} \cdot c_{\phi};$$

$$\omega_d = \frac{1}{J_d \cdot p} \left( M_d - \frac{M_y}{N} - M_{тд} \right);$$

$$M_y = f(\Delta\varphi_m);$$

$$\omega_m = \frac{1}{J_m \cdot p} (M_y - M_{тм} - M_c).$$

У рівняннях прийняті наступні позначення:  $S_{\text{упр}}$  – величина вхідної дії;  $k_{\text{ym}}$  – коефіцієнт передачі підсилювача потужності;  $U_d$  – напруга, що поступає на якірну обмотку ПД;  $R_y$  – опір якірної обмотки ПД;  $L_y$  – індуктивність якірної обмотки ПД;  $p$  – оператор диференціювання;  $c_\phi = k_d \Phi$ ;  $k_d$  – конструктивний коефіцієнт ПД;  $\Phi$  – магнітний потік ПД;  $M_y$  – момент пружності КПС;

$$\Delta\varphi_M = \frac{1}{p} \cdot \left( \frac{\omega_d}{N} - \omega_M \right);$$

$$f(\Delta\varphi_M) = \begin{cases} c \cdot (\Delta\varphi_M - 0,5 \cdot \sigma) & \Delta\varphi_M > 0,5 \cdot \sigma; \\ 0 & \text{при } -0,5 \cdot \sigma < \Delta\varphi_M < 0,5 \cdot \sigma; \\ c \cdot (\Delta\varphi_M + 0,5 \cdot \sigma) & \Delta\varphi_M < -0,5 \cdot \sigma; \end{cases}$$

$J_d$  – момент інерції ротора ПД;  $N$  – передавальне число КУС;  $\omega_d$  – швидкість валу ПД;  $M_{\text{тд}}$  – моменти сухого тертя в підшипниках ПД;  $M_{\text{тм}}$  – момент тертя КУС;  $J_M$  – момент інерції навантаження СО;  $M_c$  – збурюючий момент, обумовлений коливаннями корпусу носія;  $\omega_m$  – швидкість обертання навантаження СО;  $c$  – коефіцієнт жорсткості елементів трансмісії;  $\sigma$  – величина люфту між зубами провідної і відомої шестерні.

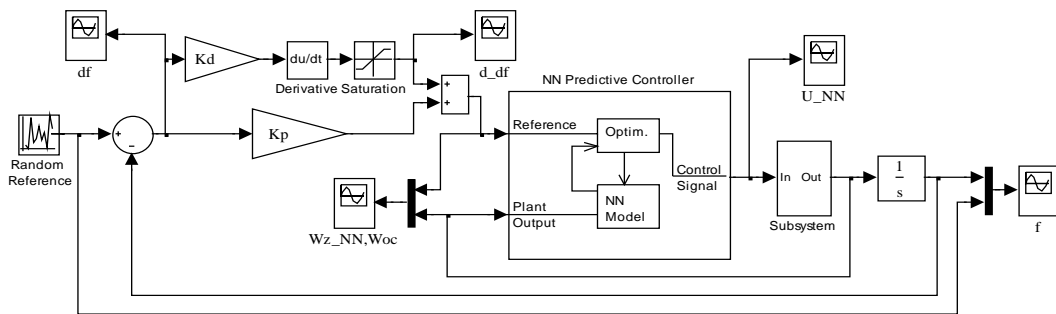


Рис. 1. Схема нейромережевої системи управління

Схема включає блок нейроконтролера NN Prediction Controller, блок генерації еталонного ступінчастого сигналу з випадковою амплітудою, блоки побудови графіків і блоки, що відносяться до об'єкту управління. У контур положення включений пропорційно – диференціальний регулятор. Коефіцієнти посилення пропорційної і диференціальної частини

позначені  $K_p$  і  $K_d$  відповідно. Ланка Saturation служить для обмеження сигналу диференціальної частини регулятора.

Схема підсистеми Subsystem приведена на рис. 2. Дана схема складена на підставі вищенаведених рівнянь динаміки виконавчого пристрою стабілізатора озброєння.

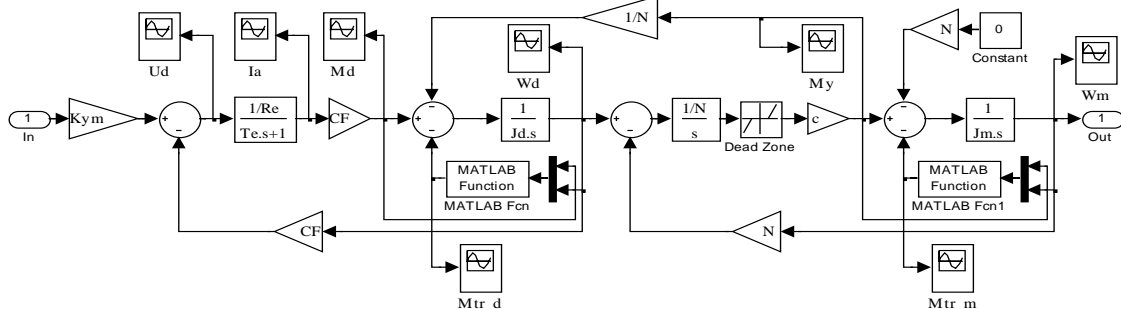


Рис. 2. Схема підсистеми Subsystem

Електрична частина приводу представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з коефіцієнтом посилення  $1/R_{\text{я}}$  і постійною часу, рівною електромагнітній постійній часу якірної ланцюга  $T_{\text{э}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}}$ . Блоки MATLAB Fcn і MATLAB Fcn1 використовуються для завдання моментів сухого тертя на валу двигуна і механізму. Наявність люфту в кінематичному пристрої сполучення моделюється за допомогою ланки Dead Zone. Дія збурюючої дії  $M_{\text{с}}$  в даній схемі не враховується.

### 3. Принцип побудови нейроконтролера з прогнозом

У якості нейрорегулятора контура швидкості вибраний регулятор з прогнозом NN Predictive Controller; реалізований в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. Схема рис. 3 ілюструє принцип побудови нейрорегулятора. Схема складається з наступних компонент: керованого об'єкту, неймережевої моделі об'єкту управління і алгоритму мінімізації функціонала якості, що визначає вхідний сигнал, необхідний для досягнення бажаної поведінки об'єкту. Власне регулятор складається з блоку оптимізації і блоку нейронної мережі.

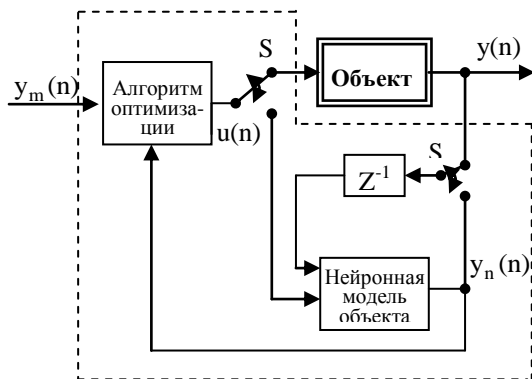


Рис. 3. Схема системи нейроуправління з прогнозом

Принцип роботи системи полягає в наступному. Вхідний сигнал служить входом для блоку оптимізації. Оптимізаційний алгоритм розраховує сигнал, який служить входом для об'єкту або моделі об'єкту. Двополюсний двохпозиційний перемикач S встановлюється в положення до об'єкту, коли алгоритм використовується для визначення оптимального вхідного сигналу, який мінімізує вибраний критерій якості управління.

Між тактами перемикач встановлений в положення до моделі об'єкту, де оптимізаційний алгоритм використовує цю модель для розрахунку наступного входу, що управляє, шляхом прогнозу у відповідь сигналу, отриманого від моделі об'єкту. Як тільки функціонал якості мінімізований, цей вхідний сигнал подається на об'єкт.

Алгоритм нейроуправління з прогнозом складається з наступних основних кроків:

1) генерується задаюча траєкторія; якщо майбутня траєкторія  $y_m(n)$  невідома, вважається  $y_m(n) = \text{const}$ ;

2) використовуючи заздалегідь розрахований управляючий вхідний вектор і нейронну модель об'єкту управління, виконується прогноз поведінки об'єкту;

3) розраховується новий управляючий вхідний сигнал, що мінімізує функціонал якості;

4) повторюються кроки 2 і 3, поки не буде досягнута необхідна мінімізація;

5) посилається перший управляючий вхідний сигнал на об'єкт;

6) повторюється увесь процес для кожного часового кроку.

Якість обчислення при реалізації узагальненого управління з прогнозом в основному залежить від вибору мінімізуючого алгоритму для оптимізаційного блоку. Існують декілька алгоритмів мінімізації, які реалізуються в нейрорегуляторах, такі як Non-gradient, Simplex і Successive Quadratic Programming. Вибір методу мінімізації може бути заснований на наступних критеріях: число ітерацій, обчислювальні витрати і точність рішення. У загальному випадку, ці алгоритми вимагають великого числа ітерацій, що робить управління в режимі реального часу скрутним. Дуже невелике число публікацій присвячені реалізаціям управління в режимі реального часу для об'єктів, що мають великі постійні часу. Для можливості використання в системах з об'єктами, що мають малі постійні часу, потрібний швидший оптимізаційний алгоритм. Регулятор, що синтезується, використовує алгоритм Ньютона-Рафсона, який має квадратичну збіжність, тоді як інші алгоритми мають нижчу швидкість збіжності. Вища швидкість збіжності алгоритму Ньютона-Рафсона вимагає високих обчислювальних витрат, але виправдовується показником швидкості збіжності.

Якість моделі об'єкту впливає на точність прогнозу. Для реалізації узагальненого управління з прогнозом потрібна адекватна модель об'єкту. Існують методи, що забезпечують високу точність моделювання у разі лінійного об'єкту. Але, у разі нелінійного об'єкту, завдання є складнішим. На сьогоднішній день є два підходи для моделювання нелінійних об'єктів.

Перший полягає в лінеаризації об'єкту на безлічі робочих крапок. Якщо об'єкт істотно нелінійний, то безліч робочих крапок може бути дуже великою.

Другий підхід полягає в розробці нелінійної моделі, яка залежить від допущень щодо динаміки нелінійного об'єкту. Якщо ці допущення не вірні, то знижується точність моделі. Моделі з використанням неймереж дають можливість справитися з нелінійною динамікою. Для нелінійного об'єкту здатність робити точні прогнози може бути значно по-

кращена, якщо для вивчення динаміки об'єкту використовувати нейронну мережу, замість стандартних підходів моделювання.

Алгоритм нейроуправління з прогнозом ґрунтується на мінімізації функціонала якості на кінцевому діапазоні прогнозів. Функціонал якості використовується в справжній роботі, має наступний вигляд

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [y_m(n+j) - y_n(n+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(n+j)]^2,$$

де  $N_1$  – нижня межа прогнозу;  $N_2$  – верхня межа прогнозу;  $N_u$  – діапазон управління;  $y_m$  – бажана траєкторія;  $y_n$  – передбачений вихід нейронної мережі;  $\lambda$  – ваговий множник;  $\Delta u(n+j)$  – зміна, визначується таким чином:  $u(n+j) - u(n+j-1)$ .

Цей функціонал мінімізує не тільки середньоквадратичну помилку між еталонним сигналом і сигналом, що видається моделлю об'єкту, але також зважену середньоквадратичну швидкість зміни сигналу, що управляє.

Коли функціонал якості мінімізований, генерується вхідний сигнал, що управляє, що дозволяє об'єкту відстежувати задану траєкторію з деякою точністю. Функціонал якості містить чотири параметри, що настраюються  $\lambda$ . Параметри  $N_1$  і  $N_2$  задають межі, усередині яких обчислюється помилка стеження.  $N_u$  є межею діапазону управління. Єдине обмеження, що накладається на значення  $N_u$  і  $N_1$  наступне: вони повинні бути менше або рівні  $N_2$ . Друга сума містить ваговий множник, який введений для управління балансом між першою і другою сумою.

Для реалізації оптимального управління, функціонал якості мінімізується за допомогою алгоритму Ньютона-рафсона. Синтез нейроконтролера складається з двох етапів: етап ідентифікації об'єкту управління і етап синтезу закону управління. На етапі ідентифікації розробляється модель керованого об'єкту у вигляді нейронної мережі, яка на етапі синтезу використовується для синтезу регулятора. У даній роботі виконаний синтез нейроконтролера з прогнозом NN Predictive Controller і визначені його оптимальні параметри.

#### 4. Моделювання системи і аналіз отриманих результатів

Було виконано моделювання нейромережевої системи і проведений детальний аналіз результатів динамічних характеристик системи з урахуванням наступних чинників: моментів сухого тертя на валу двигуна і механізму, люфту між елементами механічної частини системи, впливу зовнішніх збурюючих дій, що діють на озброєння; перешкод вимірювання основних координат

В процесі моделювання системи визначено оптимальне значення коефіцієнту пропорційної і ди-

ференціальної складової регулятора контуру швидкості  $k_p=25$  і  $k_d=0,04$  відповідно.

В результаті аналізу динамічних характеристик системи встановлено, що нейромережева система забезпечує високу якість регулювання з урахуванням всіх перерахованих чинників при різних видах тестових вхідних діях ступінчастому із змінною амплітудою, лінійно – наростаючому з різним темпом наростання, гармонійному. Система є нечутливою до зміни параметрів об'єкту управління в межах 30%. Виконуються також додаткові вимоги до системи: без перерегулювання при ступінчастій вхідній дії відпрацьовується кут блоку озброєння в діапазоні: від  $\varphi_3=0,01$  рад до  $\varphi_3=1$  рад. Час відрізок кута  $\varphi_3=0,05$  рад складає  $t=0,12$  с; мінімальна швидкість наростання і зменшення відрізок кута при лінійно вхідному, що змінюється, дії складає  $\omega_{\varphi,\min}=0,00035$  с<sup>-1</sup>; помилка відрізок кута синусоїдального сигналу з частотою 1 гц і амплітудою 3°; (0,053 радий) не перевищує 0,002 рад (0,114°)

Як приклад на рис. 4 показані графіки перехідних процесів основних змінних стану системи при ступінчастій вхідній дії.

Для наочності перехідні процеси приведені для “великих” і “малих” значень стрибків задаючої дії, що знаходяться в межах  $\varphi_3 = -1 \div 1$  рад і  $\varphi_3 = -0,1 \div 0,1$  рад.

Як видно з графіків, перехідні процеси мають високі динамічні характеристики. Відрізок кута відбувається за мінімально можливий час, визначуваний постійними часу електроприводу, при номінальній напрузі двигуна. Обмеження напруги двигуна досягається шляхом завдання відповідних значень параметрів повчальної послідовності при виконанні процедури ідентифікації об'єкту управління.

#### Висновки

У статті виконано синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин.

Розроблена структурна схема нейромережевої системи, компонентами якої є: пропорційно - диференціальний регулятор положення і нейромережевий регулятор швидкості. При складанні моделі об'єкту управління враховані моменти сухого тертя на валу двигуна і робочого механізму, а також наявність люфту між зубами провідної і відомої шестерні. Для урахування пружності елементів кінематичного пристрою сполучення, механічна частина представлена у вигляді двохмасової системи. Виконано синтез нейрорегулятора з прогнозом NN Predictive Controller, реалізованим в системі MATLAB. Проведено моделювання системи. Встановлено, що нейромережева система має високі динамічні характеристики.

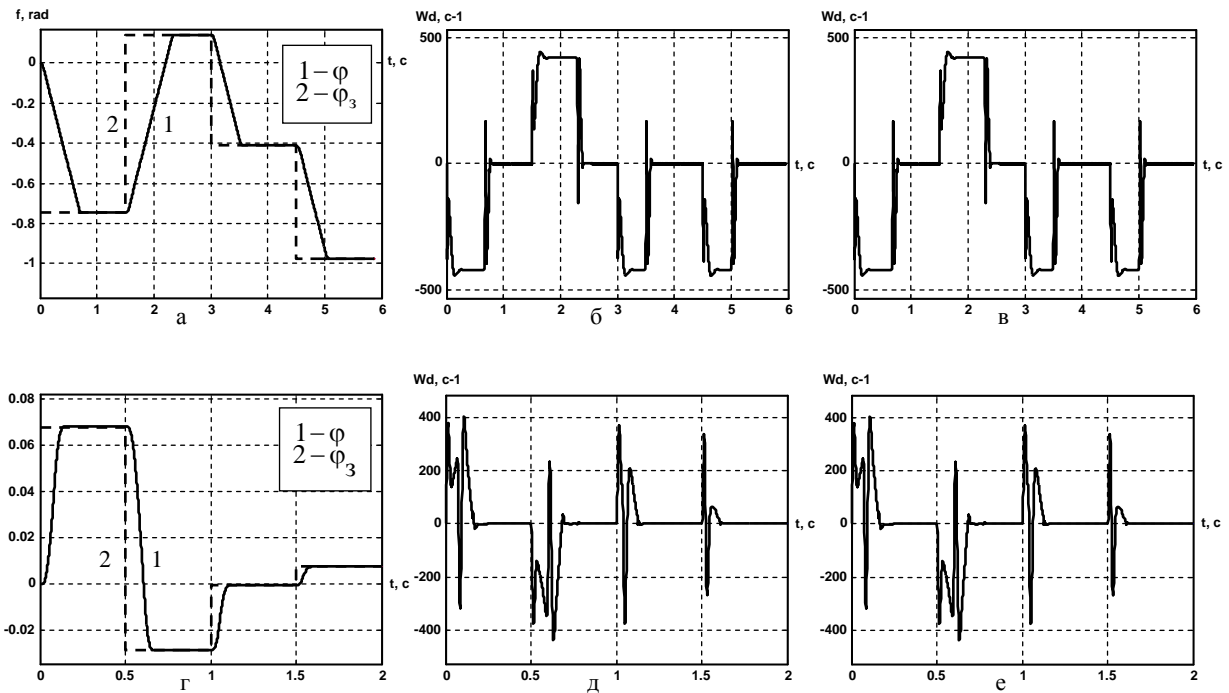


Рис. 4. Графіки перехідних процесів змінних стану системи:  
 а, г – відробітки заданого кута  $\varphi$  ; б, д – швидкості механізму  $\omega_M$  ; в, е – швидкості двигуна  $\omega_D$

### Список літератури

1. Александров С.С., Козлов Е.П., Кузнецов Б.И. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 490 с.
2. Александров Е.Е., Борисюк М.Д., Кузнецов Б.И. Параметрическая оптимизация многоканальных систем автоматического управления. – Х.: Основа, 1995. – 272 с.
3. Терехов В.А., Ефи мов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: ИПРЖР, 2002. – 80 с.
4. Руденко О. Г., Бодянский Е.В. Основы теории искусственных нейронных сетей. – Харьков: Телетех, 2002. – 317 с.

5. Круглов В.В., Борисов В.В., Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.

6. Клепиков В.Б., Палис Ф., Цепковский Ю.А. Гибридные нейронные сети в управлении электромеханическими системами // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып. 10, Т.1. – С. 29-33.

Надійшла до редколегії 4.02.2008

**Рецензент:** д-р фіз.-мат. наук, проф. В.Н. Самоваров, Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України, Харків.

### СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ОРУЖИЯ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН С НЕЙРОСЕТЕВЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Б.И. Кузнецов, Т.Е. Василец, А.А. Варфоломеев

Выполнен синтез нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин. Разработана структурная схема системы, компонентами которой является: пропорционально – дифференциальный регулятор положения и нейросетевой регулятор скорости. Выполнен синтез нейрорегулятора с прогнозом. Проведено моделирование системы. Установлено, что разработанная нейросетевая система имеет высокие динамические характеристики.

**Ключевые слова:** нейроконтролер с предвидением, нейросетевая система, система наведения и стабилизации вооружения легкобронированной машины, из нейроконтролером.

### LIGHT-ARMORED MACHINES ARMAMENT AIMING AND STABILIZING SYSTEM WITH NEURO-CONTROLLER

B.I. Kuznetsov, T.E. Vasilets, A.A. Varfolomeyev

The synthesis of the neuronet system of aiming and stabilizing of armament of легкобронированных машин is executed. The flow diagram of the system the components of which is developed: proportionally is a d-regulator of position and neuronet-regulator of speed. The synthesis of neuroregulator is executed with a prognosis. The design of the system is conducted. It is set that the developed neuronet system has high dynamic descriptions.

**Keywords:** neuroregulator with a foresight, neuronet system, system of aiming and stabilizing of armament of easy-armoured machine, from neuroregulator.